

ファラデープローブによる水ホールスラスタの性能推定と キセノン作動との比較

Performance estimation of a water Hall thruster by a Faraday probe and comparison with xenon

○桑原 宙暉(東大・院)・白須 健人(東大・院)・川嶋 嶺(東大)
 峯松 涼(東大・院)・上瀧 優希(東大・院)・藤森 蒼天(東大・院)
 関根 北斗(東大)・小泉 宏之(東大)・中川 悠一(Pale Blue)・渡邊 裕樹(Pale Blue)
 小紫 公也(東大)

○Hiroki Kuwabara(The University of Tokyo)・Kento Shirasu(The University of Tokyo)・Rei Kawashima(The University of Tokyo)・Ryo Minematsu(The University of Tokyo)・Yuuki Jotaki(The University of Tokyo)・Aoma Fujimori(The University of Tokyo)・Hokuto Sekine(The University of Tokyo)・Hiroyuki Koizumi(The University of Tokyo)・Yuuichi Nakagawa(Pale Blue)・Hiroki Watanabe(Pale Blue)・Kimiya Komurasaki (The University of Tokyo)

Abstract

In this study, beam measurement of a water Hall thruster is conducted by a Faraday probe. The inner coil current and the accumulation chamber pressure were the parameters, which is related to magnetic field and mass flow rate. As a result, mass utilization efficiency and current utilization efficiency monotonously increased as magnetic field increases, whereas they did not change by mass flow rate. Beam efficiency did not change at these experiments. Under some assumptions, anode efficiency was estimated about 4% which is much lower than hall thruster with xenon. That was due to low mass utilization efficiency, which was caused by lower molecular weight and low ionization cross section of water. In conclusion, mass utilization efficiency has to be improved and operation in high magnetic field may be effective. The Difficulties are that mass flow rate drifts during operation. In addition, operation can not be conducted under high magnetic field now. By solving these problems and conducting experiments for more parameters, performance of the thruster will get better.

記号の説明

η_b : ビーム効率
 η_c : 位置
 η_m : 推進剤利用効率
 η_n : 中性粒子利用効率
 η_q : 電荷効率
 η_v : 電圧利用効率
 η_a : アノード効率
 F : 推力
 \dot{m} : 質量流量
 I_{sp} : 比推力
 P_{acc} : アキュムレータ圧力
 P_b : チェンバ内背圧
 C : コンダクタンス
 r_c : コレクタ半径
 R_{sw} : プローブ掃引半径

j_c : 電流密度
 I_b : 総ビーム電流
 I_a : 軸方向ビーム電流
 I_d : 放電電流
 V_d : 放電電圧
 e : 電荷素量
 m_{ion} : H_2O^+ の質量
 K_n : クヌーセン数
 λ : 平均自由行程
 L : 系の代表長
 Q : 体積流量
 R : 質量気体定数
 T_g : 流路内での推進剤温度
 \dot{N} : 単位時間・単位体積当たりプラズマ生成量
 n_e : 電子密度
 n_n : 中性粒子密度
 K_{iz} : 電離衝突の速度定数

U_i : チャネル内イオンの平均速度

L_{iz} : チャネル内電離領域の長さ

1. 研究背景

近年の小型衛星の需要の高まりに伴い小型かつ小電力の電気推進機の開発が進んでいる。高い比推力によりペイロードを増やすことができる電気推進機であるが、推力電力比が小さくミッション期間が長くなるという欠点がある。しかしながら、ホールスラスタは電気推進としては推力電力比が大きく、比推力も高いバランスのとれたスラスタであるため地球近傍のミッションなどでよく利用されてきた。これまでは体積表面積比が小さいことから小電力帯での効率が低いという問題があったが、近年では 100W 級でもアノード効率 30%程度の性能に達しており¹⁾、また Exotrail で開発されたホールスラスタは効率こそ 15%と低いが、システム全体での消費電力は 60 W と少ない²⁾。SAP の効率向上などによる供給電力の上昇もあり、今後 100 kg 程度の小型衛星でもホールスラスタの利用は増加すると考えられる。

しかし小型衛星は電力だけでなく体積にも大きな制限がかかる。そのため既存の推進剤であるキセノンは小型衛星に搭載しようとする高圧ガスタンクが占める体積の割合が大きくなり、推進系に占める推進剤の割合が少なくなる。さらに小型衛星は安全性が求められるので高圧ガスを搭載することがもとより難しい。このような背景からホールスラスタやイオンスラスタを中心に、キセノンに代わる代替推進剤の研究がなされてきた¹⁻⁵⁾。高圧ガスタンクが不要かつ安全性の基準を満たす代替推進剤の候補としてはビスマス、ヨウ素、水、アダマンタンなどがあげられる。これらはすべて常温で固体もしくは液体になっていて密度が高く、また毒性もヒドラジンなど既存の化学推進剤と比べると弱い。このうちビスマスについては分子量の大きさから高い性能が期待できるが、800 K 程度の高温でないとい昇華しないため系が複雑になり熱損失も大きいという課題がある。ヨウ素については分子量の大きさに加えて温度もそれほど高く保つ必要がなく、また電離エネルギーが低いことから積極的に研究開発が行われている。例として Busek の Szabo らは 200W で作動するヨウ素ホールスラスタを開発し、推力 13 mN、比推力 1500 s、アノード効率 48%という性能を出している³⁾。アダマンタンは日常的に工業用品として使われており入手性が高いのに加え、分子量も 136.23 と高く主にイオンエンジンで研究開発が行われている⁴⁾。

そして代替推進剤の中で最も扱いやすさと安全性の面で優れているのが水である。水は地球上に広く存在しているため調達性とコストが低いのは言うまでもなく、人体への影響度もはるかに小さい。また常温常圧で液体なので密度が高く、常温での蒸気圧の高さから推進剤タンクを高温に保つ必要がない。このため複雑な加熱機構や断熱機構が不要で熱損失も小さくなる。これらのメリットから水は低コストかつ開発

期間が短いという小型人工衛星の利点を生かすのに適した推進剤といえる。先にあげたヨウ素などと比べても安全性やコスト、取り扱いの容易さなどの点で水が秀でており、衛星開発のハードルをより下げることにつながる。

以上の観点から 100W という低電力で水を推進剤とするホールスラスタは小型衛星の安全性や体積の制限を満たしており、また小型衛星の利点をより生かすことができる。本研究ではこの 100W 級水ホールスラスタを対象とし、ファラデープローブによるビーム測定の結果から基本性能を推定した。さらにキセノンでの作動時と比較することで性能を向上させるうえでの方針についても検討している。

2. 実験装置

2.1 実験系全体

本実験で使用したチェンバは直径 1m、奥行き 2.6 m であり、チェンバ内の模式図は図 2 のとおりである。以下の節で作動させたホールスラスタと推進剤供給装置について説明する。

2.1 スラスタヘッド

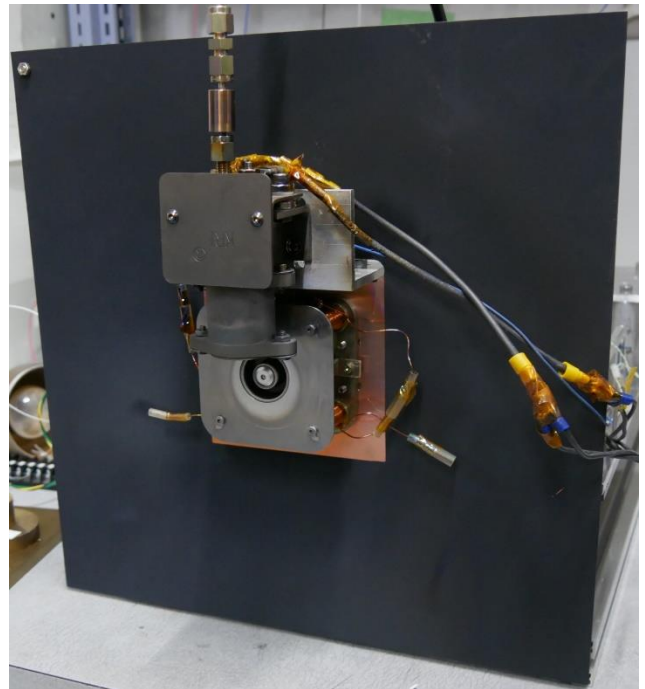


図 1 スラスタヘッドの概観

図 1 はスラスタヘッドの全体図である。アノードはいわゆる SPT と呼ばれるタイプで、キセノンで 100W 級の作動に成功しているモデルを参考に設計されている¹⁾。放電チャンネルの直径は 20 mm、幅は 6 mm で内壁はセラミックになっている。またアノードには作動中の温度上昇を抑えるため、黒体スプレーを塗布した銅板をはさんで放熱している。またカソードについてはプラズマブリッジカソードを用いており、

キセノンを供給して作動させている。プラズマが着火しやすいようにアノードに対して垂直かつ出口付近に配置されており、またキセノンの影響を小さくするためカソード流量は最小限で稼働している。

$$\dot{m} = \frac{Q}{RT_g} = \frac{CP_{acc}}{RT_g} \quad (2)$$

2.2 水供給系

水の供給装置は大きく分けてアキュムレータと水タンクの二つに分けられる。水タンクとアキュムレータの間には調圧用バルブがあり、このバルブの開閉サイクルのデューティ比を制御することでアキュムレータ内の圧力を制御できる。圧力の調整には Arduino を使っており、圧力計の値をもとにフィードバック制御を行っている。体積流量 $Q(\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s})$ と質量流量 $\dot{m}(\text{kg}/\text{s})$ はアキュムレータ内の圧力から以下のようにより求まる。コンダクタンス C はアキュムレータからアノード放電チャンネルまでの流路のコンダクタンスを意味する。

$$Q = C(P_{acc} - P_b) \sim CP_{acc} \quad (1)$$

アキュムレータの圧力は 1000~3000 Pa でありこのときクヌーセン数 $K_n = \lambda/L$ は $0.01 < K_n < 0.1$ となっている。ただし λ は気体分子の平均自由行程、 L は系の代表長である。アキュムレータからスラストヘッドまでは中間流になっていると考えられ、その場合コンダクタンスは温度と圧力によって変わる。本実験ではコンダクタンスは事前に電子天秤を用いて実施した質量流量の校正試験から(2)式による線形フィッティングを行い求められた値を使用した。なお流量校正時はプラズマを着火させていないので作動時とは推進剤流路の配管の温度が異なる。そのため圧力に対する質量流量の依存性について、式(2)のように係数が温度に反比例して変わってくるが今回その影響は加味していない。これは実験装置の都合により配管内のガスの温度を測定できていないためである。

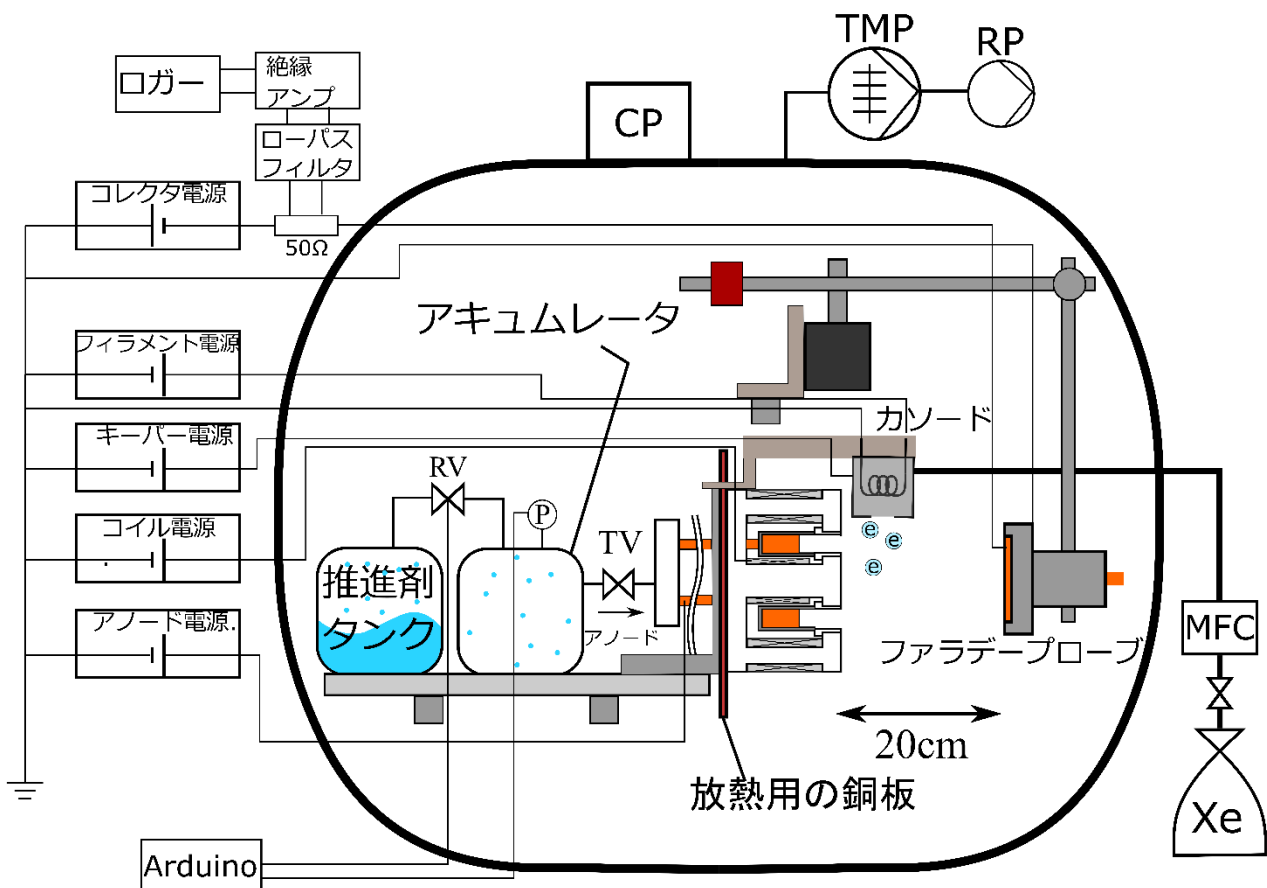


図2 実験の模式図

2.3 ファラデープローブ

実験で使用されるファラデープローブの銅のコレクタは直径 10 mm でその外周部に外径 20 mm のアルミでできたガードリングがついている。ビーム測定時にはスラストヘッド真上のモーターにより 20 cm の距離で 180° 掃引を行った。なおプローブには -20V の負電圧を印加して電子の流入を防いでいる。

プローブによる計測時には二次電子放出やシース膨張などが測定値に影響する^{6,7)}が、今回はそのようなずれは小さいものとして考慮せずに各性能値や効率を算出している。なお、ファラデープローブの角度分解能は(3)式より求められる^{6,7)}。

$$\Delta\theta = \frac{2r_c}{R_{sw}} \quad (3)$$

今回はモーターの角度分解能が 0.72° , ファラデープローブの角度分解能が 2.865° だったことから測定分解能は $\delta\theta = 3.6^\circ$ とした。

3. 実験方法

3.1 実験条件

実験条件は表 1 のとおりである。パラメータは磁場とアキュムレータ圧力値の二つで、これらは現状作動できる範囲の最小値と最大値、中間値でとった。アノード質量流量はアキュムレータ圧力から算出した値である。

表 1 実験条件

	単位	値
アキュムレータ圧力	Pa	2400,2500,2600
アノード質量流量(水)	mg/s	1.24, 1.31, 1.37
背圧	Pa	$\leq 2.3 \times 10^{-2}$
カソード流量(キセノン)	sccm	0.5
放電電圧	V	200
規格化コイル電流	-	0.8, 0.9, 1.0

3.2 作動手順

水ホールスラストの作動時にはまず磁場がない状態でカソード、アノードの順で着火させた後コイルにより磁場を印加している。ファラデープローブによるビーム計測時には放電電圧を 200 V で一定にそろえているが、図 3 のとおりプローブを掃引している間に温度や放電電流がドリフトしている。実験時は放電電流が減少を続けた後、1 A を下回るところでプラズマが消えており定常状態での作動を維持することはできなかった。ここではなるべく定常に近い状態でデータを取るためにプラズマが消える直前のデータ一回分のみ(図 3 の緑の部分)を効率の推定に用いた。プラズマが消える時には単位時間当たりの放電電流の変化が小さいため、定常に近いと判断したためである。

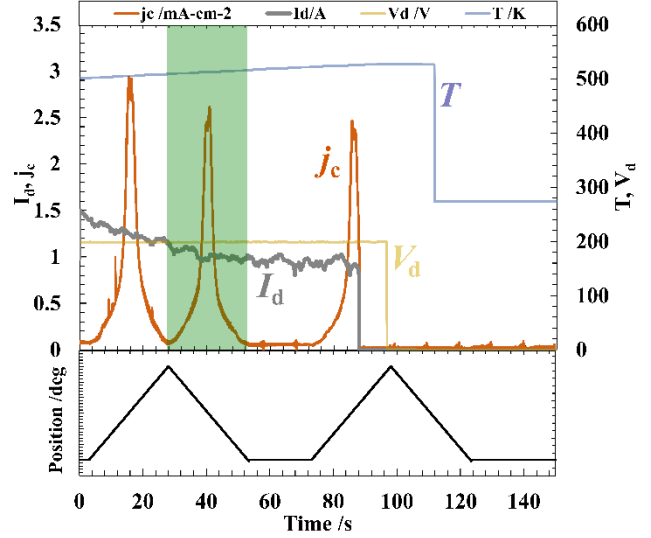


図 3 諸パラメータの時間履歴

3.2 効率の推定.

ホールスラストにおけるアノード単体の性能を表す数値としてアノード効率がよく用いられている。これはカソードやコイルの電力を除いて計算した推進効率を意味しており、次の式のように 6 つの効率に分解することができる。

$$\eta_a = \eta_m \eta_c \eta_v \eta_q \eta_n \eta_b \quad (4)$$

ファラデープローブから得られる効率は推進剤利用効率 η_m 、電流利用効率 η_c 、ビーム効率 η_b の 3 つであり、それらは以下の式で表される^{1,8)}。

ここで推進剤利用効率を求めるのにイオンがすべて H_2O^+ であると仮定している。そのため多価イオンの存在から実際の値より高い値で推定していることになる。

$$\eta_m = \frac{m_{ion} I_b}{em} \quad (5)$$

$$\eta_c = \frac{I_b}{I_d} \quad (6)$$

$$\eta_b = \left(\frac{I_a}{I_b}\right)^2 \quad (7)$$

I_b は総ビーム電流, I_a はビーム電流の軸方向成分であり、(8)~(10)式のように求めた。

$$\Delta S_k = \begin{cases} 2\pi r_c^2 (1 - \cos(1/2\delta\theta)) (k=0) \\ 2\pi r_c^2 \left(\cos\left(\left(k - \frac{1}{2}\right)\delta\theta\right) - \cos\left(\left(k + \frac{1}{2}\right)\delta\theta\right) \right) (k \neq 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$I_b = \sum_{k=0}^n j_c((k+1/2)\delta\theta) \Delta S_k \quad (9)$$

$$I_a = \sum_{k=0}^n j_c((k+1/2)\delta\theta) \cos((k+1/2)\delta\theta) \Delta S_k \quad (10)$$

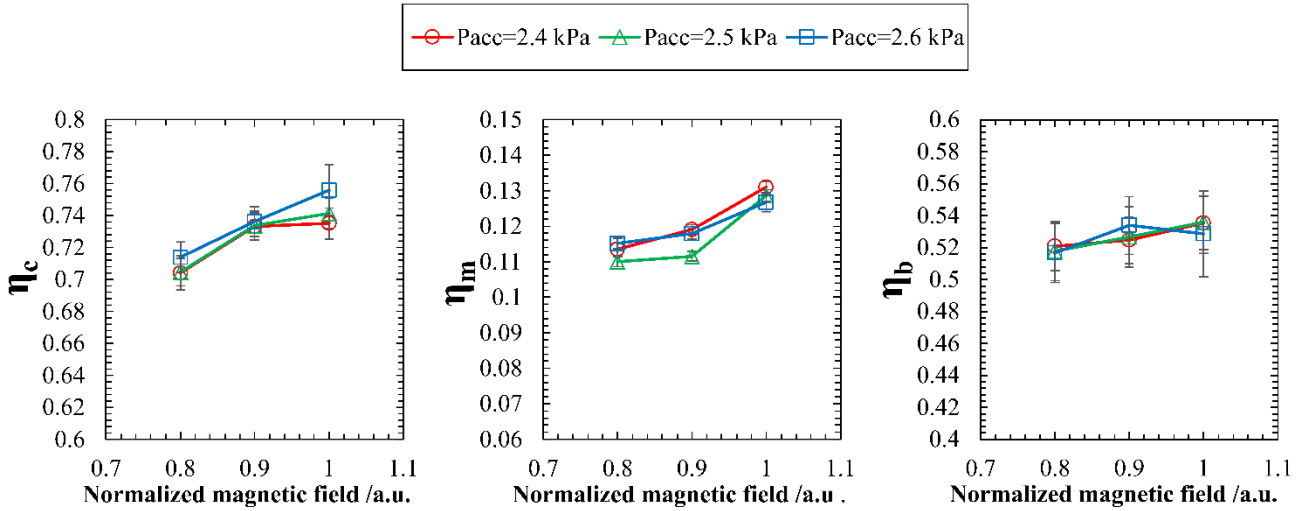


図4 各効率の流量磁場依存性

4. 実験結果

4.3 効率

上図は質量流量と磁場をパラメータとして変化させたときの推進剤利用効率, 電流利用効率, ビーム効率の値を示している.

凡例の P_{acc} はアキュムレータ内の圧力で, 質量流量に比例する. アキュムレータ圧力に対応する質量流量は表1に示すとおりである.

図4から磁場を増加させた場合電流利用効率と推進剤利用効率がおおむね単調増加していることが分かる. 質量流量が増加したときは電流利用効率は上昇しており, 推進剤利用効率は磁場によって傾向が変わっている. ただし誤差の範囲や後述するような流量制御の不確かさを考慮すると, 必ずしもこの傾向が正しいものとは限らない. また, ビーム効率については磁場, 流量ともに依存性はみられない.

4.4 総合的な性能

ファラデープローブによる計測で推定できない3つの効率について, キセノンを推進剤として作動させた先行研究のデータからまとめて $\eta_q \eta_n \eta_v = 0.8$ と仮定をおくことで性能を推定した. 先行研究での測定値はキセノン作動時のものであるため, 水での作動時には異なる値になる可能性がある. またアノード電力, 推力, 比推力を以下の式から算出した.

$$P_a = I_d V_d \quad (11)$$

$$F = \sqrt{2\dot{m}\eta_a P} \quad (12)$$

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} \quad (13)$$

表2 本実験での水ホールスラスタの代表性性能

	単位	値
アキュムレータ圧力	Pa	2600
アノード質量流量(水)	mg/s	1.37
放電電圧	V	200
規格化コイル電流	-	1.0
放電電流	A	1.15
アノード効率	%	4.1
アノード消費電力	W	231
推力	mN	4.91
比推力	s	389
推力電力比	mN/kW	21.3

5. 考察

5.1 作動時のドリフト

今回の実験では定電圧作動時に放電電流が減少を続ける現象がどの条件でも再現され, 放電電流が1 Aを下回ったところでプラズマが消えた. この原因としては大きく三つに分けて考えることができる. 一つは質量流量 \dot{m} の減少で, もう一つは推進剤利用効率 η_m の低下, そして電流利用効率 η_c の増加である.

このうち電流利用効率について, 図3をみるとビーム電流密度 j_c の測定値が時間とともに小さくなっているのので, ビーム電流全体も小さくなっていると考えられる. そのため放電電流の減少の一因として電流利用効率の増加が含まれるのかはわからないが, 可能性はある. その一方で質量流量と推進剤利用効率については, ビーム電流が漸減していることから片方もしくは両方が減少していることがわかる.

質量流量は, 式(1)からコンダクタンスの変化が影響すると考えられる. 時間の経過とともに温度が上昇しているのので, それに伴いコンダクタンスも変化する. それ以外にも水の凝縮や熱膨張による流路の狭窄で流量が減少している可能性も否定できない. また式(2)から同じ流量でも質量流量は温度

に反比例して下がることが分かり、これも温度の上昇に伴う放電電流の減少が見られた実験結果と整合が取れている。

推進剤利用効率の低下に関しては、温度上昇による中性粒子密度の低下が原因だと推察される。スラスト内部の温度が上がると中性粒子の熱速度が上昇し、中性粒子密度は下がる^{9,10}。(14)式はホールスラストチャネル内の長さ L_{iz} の電離領域に対して領域に侵入するイオンと排出される中性粒子の数を0と仮定して領域内のイオンの増減を表した式である¹¹。この式の n_i はイオン密度、 n_n は中性粒子密度、 K_{iz} は電離衝突の速度定数で U_i は平均速度である。この式の左辺第一項は領域内のイオン密度の時間変化、第二項は領域から排出されるイオンの総量、右辺は単位体積・単位時間当たりのイオンの生成量を示している。

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{n_i U_i}{L_{iz}} = n_i n_n K_{iz} \quad (14)$$

温度の上昇によってチャネル内の中性粒子密度が減少する時、(14)式から単位体積・単位時間当たりのプラズマ生成量は減少する。この時定常状態を仮定すると左辺第一項は0となり左辺第二項が減少することになる。これは単位時間で電離して排出される推進剤の量の減少を意味しており、これが推進剤利用効率と放電電流の低下につながっていると思われる。

5.2 キセノン作動との比較

5.2.1 性能の比較

水ホールスラストの初期作動での性能推定値と既存のキセノンを推進剤とするホールスラストの性能を比較する。性能の比較用として、本実験と同様の放電チャネル形状のアノードでかつ同じ放電電圧で取得されたデータを参照する¹⁾。なおキセノンでの測定データは最も良い条件での値を選んでおり、水作動でのデータの取得時と磁場条件は異なる。キセノンのデータはアノード効率が最大となる磁場での値を示している。

表3 水とキセノンでの性能比較¹⁾

	水	キセノン
推進剤利用効率	0.14	0.6
電流利用効率	0.7	0.7
ビーム効率	0.55	0.6
アノード効率	0.041	0.3

表3から水作動の場合キセノンと比べて推進剤利用効率が0.25~0.3倍程度と大きく劣っていることが分かる。その他にもビーム効率がキセノンでのデータのほうが大きくなっているが、5%程度と差が小さいので実験の再現性が確かめられなければ比較することは難しい。

推進剤利用効率について水作動の場合に小さくなっているのは二つ理由が考えられる。一つは水分子の電離衝突断面積の小ささで、二つ目は分子量の小ささである⁹⁾。まず電離衝突

断面積は、(14)式からわかる通りプラズマの生成量に直結するパラメータであるが、これが小さい水分子はそれだけ粒子が電離しにくくなっているといえる。また分子量は水が18.0でキセノンが131.3と7倍程度の差があり、熱速度が異なる。水分子のように熱速度が大きいと中性粒子の放電チャネル内滞在時間が短くなり¹⁰中性粒子密度が減少し、プラズマ生成量も低下する。このため水分子ではイオン化されずに排出される粒子の割合が多くなり推進剤利用効率が低い値になると考えられる。電流利用効率についてはキセノンと水作動の場合で近い値をとっている。

5.2.2 流量と磁場の依存性の比較

推進剤利用効率と電流利用効率は磁場の増加に対して単調増加する傾向がみられており、これはキセノン作動でも同じ傾向が先行研究で確認されており、今回はプラズマをビーム測定に必要な時間維持できずに測定を行えなかったが、より高磁場で作動させることで効率の改善が期待できる。

流量に対する依存性については推進剤利用効率、電流利用効率、ビーム効率すべてで確認されなかったが、5.1節で述べたように流量が想定通り変化していない可能性がある。また実験装置の都合により流量を変化させた範囲も小さい。

パラメータである磁場、流量ともに今回の実験で測定できた範囲が狭いので、今後は他のパラメータも含めてより広範囲での作動を行い性能を比較する必要がある。

6. 結論

本研究ではファラデープローブによるビーム計測で水ホールスラストの初期性能を推定した。磁場と流量を変更して測定を行った結果、磁場に対して効率が增加するという傾向が見られた。その一方でアノード効率としては4%となり、キセノン作動の場合を大きく下回る結果となった。この原因として推進剤利用効率があげられ、これは高磁場での作動によって改善が期待される。ただし、今回の実験では定常状態での測定ができておらず、今後は流量や温度の制御を行ったうえで測定する必要がある。またここでは考慮していない中性粒子利用効率や電荷利用効率、電圧利用効率なども水プラズマの場合有意な差になりうるので更なる実験と検討が必要である。

謝辞

本研究は文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費 JP000959の助成を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) H. Watanabe, S. Cho and K. Kubota, "Performance and plume characteristics of an 85W class Hall thruster", *Acta Astronautica*, 166(2020), p227-237.
- 2) A. Gurciullo, J. Jarrige, P. Lascombes, D. Packan, "Experimental performance and plume characterisation of a miniaturised 50W Hall thruster", *IEPC 2019, Sep 2019, VIENNE, Austria*.
- 3) J. Szabo, B. Pote, M. Robin, "Performance Evaluation of an Iodine-Vapor Hall Thruster", *Journal of Propulsion and Power*, Vol 8, No.4, 2012.
- 4) 中野 正勝, 山本 直嗣, 大川 恭志, 船木 一幸, "昇華性物質を推進剤とするイオンエンジンの性能評価", *宇宙太陽発電シンポジウム*, Vol. 6, pp. 1-4, 2021.
- 5) Y. Nakagawa, H. Koizumi, H. Kawahara and K. Komurasaki, "Performance characterization of a miniature microwave discharge thruster operated with water", *Acta Astronautica*, 157(2019), p294-299.
- 6) D. L. Brown., M. R. Walker., W. Szabo, W. Huang and J. E. Foster, "Recommended Practice for Use of Faraday Probes in Electric Propulsion Testing", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 33, No. 3, 2017.
- 7) 渡邊 裕樹, "宇宙機用電気推進機のためのプローブ計測", *J. Plasma Fusion Res.* Vol.96, No.11, pp. 680-687, 2020
- 8) D. L. Brown, C. L. Larson and B. E. Beal, "Methodology and Historical Perspective of a Hall Thruster Efficiency Analysis", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 6, 2009.
- 9) C. F. Book and M. L. R. Walker, "Effect of Anode temperature on Hall Thruster Performance", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 5, 2010.
- 10) B. M. Reid and A. D. Gallimore, "Review of Hall Thruster Neutral Flow Dynamics", *30th International Electric Propulsion Conf.*, 17-20, Sep. 2007.
- 11) K. Hara, M. J. Sekerak, I. D. Boyd, et al., "Perturbation analysis of ionization oscillations in Hall effect thrusters", *Phys. Plasmas* 21, 122103, 2014.